

矿田构造变形岩相带的地球物理资料解译与找矿应用

张宝林^{1,2,3}, 吕古贤⁴, 余建国^{1,2,3}, 梁光河^{1,2,3}, 徐兴旺^{1,2,3}, 李志远^{1,2,3}, 张启鹏⁵,
史晓鸣⁵, 魏竣滨⁵, 许道学⁶, 李 旭⁶, 赵 鹏⁷
ZHANG Baolin^{1,2,3}, LYU Guxian⁴, YU Jianguo^{1,2,3}, LIANG Guanghe^{1,2,3}, XU Xingwang^{1,2,3}, LI Zhiyuan^{1,2,3},
ZHANG Qipeng⁵, SHI Xiaoming⁵, WEI Junbin⁵, XU Daoxue⁶, LI Xu⁶, ZHAO Peng⁷

1. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
5. 内蒙古矿业开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010;
6. 赤峰柴胡栏子黄金矿业有限公司, 内蒙古 赤峰 024005;
7. 山东黄金归来庄矿业有限公司, 山东 平邑 276000

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Innovation Academy for Earth Science, CAS, Beijing 100029, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
5. Inner Mongolia Mining Development Co., Ltd, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;
6. Chifeng Chaihulanzi Gold Mining Co., Ltd, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China;
7. Shandong Guilaizhuang Gold Mining Co., Ltd, Pingyi 276000, Shandong, China

ZHANG B L, LYU G X, YU J G, et al., 2021. Geophysical data interpretation of the tectonic deformation lithofacies belts in the ore field: Application in ore prospecting [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 542-556. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.047

Abstract: Based on the physical parameters of the rocks (ores) and the genetic types of ore deposits, the geophysical exploration models have met issues of multiple solutions for deep prospecting prediction. It is necessary to find recognizable geological targets with high precision by geophysical methods. The ore prospecting practice over past years has demonstrated that the ore field tectonic deformation lithofacies belt is an outstanding target and significant prospecting results have been achieved. At present, the geophysical exploration work of large-scale mining area is heavy, while that of medium-scale ore field is limited, and both of them lack the strategic guidance at different levels. In order to establish the geophysical identification mark of the tectonic deformation lithofacies belt in ore field, it is necessary to clarify the complex time-space relationship between geology and geophysics, and strengthen the connection between geomechanics and geophysical exploration methods. In this paper, a method of

基金项目: 内蒙古自治区地质勘查基金管理中心科研项目 (2019-KY02); 山东黄金矿业 (玲珑) 有限公司科研项目 (LLYY-2019-001); 山东黄金归来庄矿业有限公司科研项目 (GLZZB-20191201); 海南山金矿业有限公司科研项目 (HNSJ191017-195)

This research is financially supported by the research project of Geological Exploration Fund Management Center of Inner Mongolia Autonomous Region (Grant No. 2019-KY02), Shandong Gold Mining (Linglong) Co., Ltd. (Grant No. LLYY-2019-001), Shandong Guilaizhuang Gold Mining Co., Ltd. (Grant No. GLZZB-20191201), and Hainan Shanjin Mining Co., Ltd. (Grant No. HNSJ191017-195).

第一作者简介: 张宝林 (1963—), 男, 博士, 研究员, 从事矿田地质、构造物理化学、隐伏矿床定位预测理论和技术研究。

E-mail: blzhang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2021-04-01; **修回日期:** 2021-07-06; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 张宝林, 吕古贤, 余建国, 等, 2021. 矿田构造变形岩相带的地球物理资料解译与找矿应用 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 542-556. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.047

processing and interpreting geophysical information at different levels is proposed. According to the “*shaped” structural features of the tectonic traces in the study area and the characteristics of the periodic development of the tectonic system, the geophysical exploration data of different scales and dimensions are analyzed from the two levels of ore field and deposit, and the information of tectonic deformation lithofacies belts is extracted. The specific operation procedures are as follows: (1) Making an area geophysical exploration within the scope of the ore field, interpreting the “*shaped” fault structure system, and then selecting the tensional and tension-torsional ore-bearing fault structures and predicting the prospecting direction; (2) Laying out large-deep geophysical profiles in the ore-bearing fault zone, analyzing the denudation degree and burial depth, and delineating the location of prospecting targets based on the geochemical exploration information. The application results of this method in the Chaihulanzi gold field in Chifeng, Inner Mongolia is introduced. The “*shaped” distribution of structural traces of the Neocathaysian tectonic system are interpreted from the geophysical data of the ore field, and then it is confirmed that the NNW and NWW trending tectonic deformation lithofacies belts are the main ore-bearing structural belts and there is a spatio-temporal sequential relationship between them in the two mining areas. These findings, provides a basis for deep ore prospecting and prediction.

Key words: tectonic deformation lithofacies; ore field geophysics; geomechanics; structural system; “*shaped” structure; metallogenic prediction

摘 要: 基于岩(矿)石物性参数和矿床成因类型建立的地球物理勘查模型,在深部找矿预测中出现了多解性的问题,急需找到地球物理方法能够高精度识别的地质体目标。多年的找矿实践表明,矿田构造变形岩相带就是一个重要的选项,业已取得显著的找矿效果。目前,大比例尺的矿区地球物理勘查工作较多,而中比例尺的矿田地球物理研究比较薄弱,且两者均缺乏分层次的战略指导。为了建立矿田构造变形岩相带的地球物理判别标志,需要厘清地质与地球物理的复杂时间-空间关系,加强地质力学与地球物理勘探方法的联系。文章提出分层次处理和解释地球物理信息的思路,即根据研究区构造形迹的“米字型”结构特征和构造体系阶段性发展的特点,从矿田、矿床2个层次解析不同尺度-维度的地球物理勘查资料,提取构造变形岩相带信息。具体操作流程为先在矿田范围内布置面积性物探,解译“米字型”断裂构造系统,选定张性和张扭性含矿断裂构造,预测找矿方向;再在含矿断裂带布置大深度物探剖面,分析剥蚀程度和埋藏深度,结合化探信息圈定找矿靶区位置。文中以内蒙古赤峰柴胡栏子金矿田为例,介绍该方法的找矿应用效果。首先从矿田地球物理资料中解译出新华夏构造体系“米字型”分布的构造形迹,然后在2个矿区内确认了北北西和北西西走向的构造变形岩相带是主要的含矿构造带,且两者之间存在时空上的先后关系,为深部找矿预测提供了依据。

关键词: 构造变形岩相; 矿田地球物理; 地质力学; 构造体系; “米字型”结构; 成矿预测

中图分类号: P313; P552 **文献标识码:** A

0 引言

开展深部和隐伏区找矿预测,需要应用地球物理方法进行探测。中国已经拥有大量进口和国产的高精度地球物理仪器设备和数据处理软件,依据矿床成因类型和岩(矿)石物性参数,在很多成矿带、矿田、矿区建立了地球物理勘查模型(万国普,1994;刘光鼎等,1997;徐述平,2009;刘光鼎,2015;Xiao and Wang,2017;樊俊等,2019;张宝林等,2019;张伟等,2020),找矿预测取得了一定进展(周琦等,2017;张宝林等,2017,2018;甘凤伟等,2018;柳建新等,2019;

梁光河等,2019)。例如,新疆阿舍勒铜矿是一个与火山成因有关的隐伏大型块状硫化矿床,它的发现就是根据地质调查提出的有色金属找矿靶区,通过自然电场法和激发极化法等综合电法勘探发现了物探异常区,并经钻探工程验证(邓振球和王欣观,1993)。此后,对矿区及外围又投入了瞬变电磁法等新方法、新技术试验研究工作,结合地质、化探资料进行综合解释推断,提供了可能存在新的隐伏矿床的信息(任广利等,2009;李忠平,2014;田建磊等,2014;吴晓贵等,2019,2020)。国内外很多大中型矿区的发现和外围找矿,都采用了类似的地物化找矿流程,找矿效果显著。

尽管如此,还是出现了很多物探异常与钻探工程验证结果不符的情况,导致找矿成功率偏低(薛怀民等,2014;赵正等,2014;高文利等,2015;吴才来等,2016)。很多矿山(矿区)的找矿工作中都注重采用综合物探方法,但是没有弄清控岩控矿的构造时序和级序,没有实施分层次的控矿构造理论指导,找矿效果难以预测(肖晓等,2011;刘振东等,2012;陈毓川等,2013;吕庆田等,2015;陈伟等,2016);目前急需提出可以被地球物理方法高精度识别的矿化地质体目标,从而提高物探方法的找矿水平。

构造物理化学的重要任务之一,是基于构造变形岩相带的深部地球物理勘查(吕古贤,1991,2003,2019;吕古贤等,1999)。在李四光“构造结合建造”思想、涂光熾“构造-岩相带”研究、杨开庆构造动力成岩成矿理论等基础上(李四光,1953;涂光熾,1959),吕古贤提出和发展了“构造变形岩相”概念和填图方法(吕古贤,1989;吕古贤和孔庆存,1993),还对构造变形岩相类型做了详细的划分(吕古贤,2015;吕古贤等,2016,2020b)。构造变形岩相填图方法,在胶东金矿深部和外围找矿工作中发挥了重要作用,取得了一系列的找矿突破(吕古贤等,1998,2001;周国发,2009;范潇等,2015;张宝林等,2020),为推动胶东地区升级为全球第三大黄金产区作出了突出贡献。

将构造变形岩相带作为深部找矿预测目标(张宝林等,2017,2018,2019),既能够查明成矿作用的底界位置和“深部第二富集带”的发育规律,也可以显著提高地球物理勘探方法的分辨率。但是,由于地质和地球物理研究方法的时间-空间关系极为复杂,给深部钻探和物探资料的解释带来了极大的不确定性、多解性和误差。为此,必须分层次认识和解析地球物理信息,进而圈定深部勘查靶区。目前,大比例尺(1:1万以上)的矿区地球物理勘查工作较多,而中比例尺(1:5万~1:20万)的矿田地球物理研究比较薄弱。为了寻找大矿富矿、建立矿田构造变形岩相带的地球物理判别标志,需要厘清含矿地质体的时间-空间演化规律,加强地质力学与地球物理学的联系。文中对此进行较系统的阐述,并以内蒙古赤峰柴胡栏子金矿田为例,介绍有效的勘查工作流程。

1 地质学与固体地球物理学的复杂时空关系

以往的研究工作中,在对地质与地球物理的复杂时空关系认识方面,存在很多的误区。

1.1 两大学科的研究侧重点不同

地质学和固体地球物理学都将固体地球作为主要研究目标,但各自的时间属性和空间属性侧重点却明显不同。地球物理方法主要解决地质体的空间位置和结构构造问题,而不是地质过程和构造性质;地质方法主要解决地质体的物质组成和演化历史问题,而无法准确追索空间位置变化(如超大陆演化)。两者虽有交集,但差别更明显。

众所周知,地球历史的演化是单向的,存在“均变论”和“灾变论”现象,但证据链不完整,导致地质研究成果和矿床成因模型本身存在很大的不确定性、理想化且无法验证。地质方法在直接观察识别岩石类型、地质体边界等方面有较大优势,但对于地壳内部结构构造的识别则存在较大的困难。在划分成矿系统的时候,并未考虑地质体演化时间和空间位置变化的因素。

物探工作中,主要是依据不同比例尺的地质图、岩(矿)石物性参数和矿床成因模型建立地球物理勘查模型,再按照行业规范施工完成数据采集,进行数据处理和资料解译,完成报告撰写。但在资料处理过程中,遵循的是数学和物理学的原理和模型,与定量化的地质演化过程关系尚需进一步研究。到了最后阶段,要求按照地质学原理对各种物探异常作出合理解释,这实在是一个挑战。加之各种地球物理方法的原理不同,对地质体的观测方法和数据处理解释方法不同,得出的认识也是不同的。

由此可见,在提高深部找矿成功率的问题上,需要不断找到地质和地球物理的最大交集且能够互相验证。

1.2 地球物理资料解释与注意事项

常规的金属矿地球物理勘探,从目标地质体的岩(矿)石物性参数差别出发,依据地形和地质条件,完成数据采集处理,进而圈定找矿靶区,却很少考虑时间和构造体系控矿的因素。地质学家充分发挥想象力和逻辑推理能力,基于矿床成因模型概念和矿区地质特征,对地球物理资料作

出地质解释,推断矿体或含矿地质体的位置和规模,进而布置验证工程。在这个过程中,虚拟的物探异常不应脱离地质事实,对地球物理方法效果和分辨率的要求,也应该有相应的准则。

1.2.1 对断裂带的识别

地震勘探是识别断裂构造界面的最佳方法之一,人们常将物性异常带(如低阻带或低密度带)直接定义为断裂构造带或断层,在各类地质图上的推测断裂构造也常用直线或曲线表示。实际上,地震勘探的时间(深度)剖面图展示的往往是宽窄不一、断续延伸或延深的线性形迹,显示的只是空间结构图像,地震勘探波阻抗界面给出的主要是脆性断裂界面,而无法给出韧性构造界面。

应当指出的是,地震仪器记录的是地质作用的结果,而不是地质过程,更不能识别构造性质,因为断裂活动本身就是阶段性的、不连续的,断裂带的连续性和宽度是变化的,沿断裂带走向的物探异常参数也可能是不同的。断层构造的地质观察结果虽然在图上画成了连续的曲线,但实际的断裂带无论在走向和垂向上都可能是变化的,有些部分有充填物,有些部分则是空隙,由此导致断裂带的地球物理性质在平面和深部都可能是变化的,这就给地质与地球物理的关系带来了更多的不确定性。

1.2.2 划分隐伏地质体的边界

这方面工作对地球物理方法的需求主要包括:

- ①空间分辨率,如目标地质体的规模、形状、位置;
- ②时间分辨率,如地质记录的详细程度;
- ③各类岩石内部的岩性过渡边界,如亚岩相;
- ④岩浆侵入通道;等等。

虽然已经做了很多尝试,但地球物理方法在区分地质体边界方面还存在很多不确定性,而且各种方法的能力差别也很大,即使是对于构造边界分辨能力最强的地震勘探方法,也遇到了很多难题(印兴耀等,2015;未晞等,2019),难以满足实际要求。地质学家凭借知识、经验和想象力画出的物探异常解释图,往往难以得到工程验证。再如,对地震资料作出解释之前,往往要建立一套物性标志层,前提条件是地表或浅部已知的岩性。而实际情况是,地质过程非常复杂,地质记录的保存及改造情况往往超出人们的想象,地质体向深部的变化情况可能与地表地质特征完全不同。

大地构造理论认为,构造运动在地壳内形成了很多不同时期的构造层,如岩石层大地构造。地球物理勘探结果虽然也讨论构造层的问题,但只是依据物性参数的显著差异,推测深部的大型构造界面,难以得到超深钻探的实证(科兹洛夫斯基,1989)。

1.2.3 地球物理勘探工作自身的问题

地球物理勘探中所涉及各类岩石和矿物的物理性质,如密度、压力、重力、温度、弹性波传播速度、磁化率、电阻率、热导率、放射性等,是形成各种地球物理场的基础。对地球内部物质组成和结构构造的了解,目前主要是通过理论计算和实验方法推演。

金属矿地球物理勘探分为面积测量和剖面测量。常规的矿田、矿床地球物理研究流程是:第一步采集研究区内的代表性岩(矿)石标本,测定物性参数;第二步布置扫面和重点剖面测量;第三步数据处理;第四步地质解释;第五步工程验证。以上工作流程取得了比较好的找矿效果,但也暴露了很多问题:第一是标本(只采代表性岩石,而不是系统的构造变形岩相带),第二是剖面的选择,第三是异常解释,第四是对验证效果的评价。依据地球物理学原理圈定的异常部位,往往与地质认识及工程验证结果不匹配。

1.3 地质力学与地球物理勘探有共同的研究对象

地质力学主要是用力学的观点研究地质构造现象,研究地壳各部分构造形变的分布及其发生、发展过程,用来揭示不同构造形变间的内在联系。地质力学是广义的地质学的一个分支学科,同时也涉及地球物理学,天文地质学等;它与大地构造物理学有密切的联系(李四光,1953)。地质力学注重构造体系的分析,特别是活动构造的活动规律和动力来源,以及断层、褶皱等构造形迹形成的力学机理的分析,也注重研究地应力和地质因素对岩土工程的力学分析的影响。

近些年来,吕古贤提出了地质力学构造体系的4个关键特征:①构造体系的核心标志是最大主压应力面;②当前研究重点是中生代构造体系;③构造体系的建造显示“隆起-凹陷拆离”形式;④构造体系结构显示“米”字形分布(吕古贤,2019;吕古贤等,2020a,2020c)。其中,后面的两项特征,控制了构造变形岩相带的分布规律,可以用地球物理方法圈定,也是文中研究的重点。

地球物理方法的研究对象是组成现代地球的岩石和地质体，其定位时间在中新生代。而地质力学是从材料力学的角度研究地壳结构构造，两者在岩石变形和物理性质方面有着紧密的契合度。从绝对运动和相对静止的辩证关系来看，中新生代以来的地质体结构构造及其演化规律，可以成为地质力学与地球物理勘探共同的研究对象，两者具有很好的可比性。此外，原岩在不同的物理化学条件下发生力学性质的变化，如脆性、韧性等，也是地质力学和地球物理勘探共同关注的重要内容。

2 构造变形岩相带的物性特征

2.1 依靠岩石物性参数难以区分单个构造变形岩相

构造变形岩相是能够显示岩石变形、岩石地球化学分布以及形成岩相物理化学环境的地质实体（吕古贤，1989；吕古贤和孔庆存，1993；吕

古贤等，2016，2020b）。组成构造变形岩相带的是各种构造岩（tectonite），也称为动力变质岩。迄今为止，世界各地研究者已经报道了海量的岩石标本物性参数，但是，罕有专门针对构造岩的物性参数系统性研究。构造岩形成于地壳高应变带内，是与原岩组构、矿物成分完全不同的新类型岩石，包括碎裂岩系列、糜棱岩系列（刘正宏等，2020），前者主要形成于地壳浅部断层带的脆性变形环境，后者主要形成于地壳深部剪切带的塑性变形环境。

不同类型构造变形岩相的差异，主要取决于矿物种类和数量的多寡，以及构造变形样式不同。吕古贤等（2020b）按照5种地质作用划分了适于矿田层次的27个构造变形亚岩相，其中与热液成矿作用关系密切的是复成地质作用下的“层控改造岩相和构造热液岩相”，所划分的8种蚀变岩石（包括矿石矿物在内），在物性特征方面主要表现为重力低、弱磁-负磁、中高阻-中低阻（表1）。

表1 复成地质作用下的构造变形岩相岩石的物性特征（据吕古贤等，2020b修改）
Table 1 Physical characteristics of tectonic deformation lithofacies rocks under complex geological processes (modified after Lyu et al., 2020b)

构造变形岩相	构造变形亚岩相	岩石物性特征	典型矿产
层控改造岩相和构造热液岩相	矽卡岩化构造变形岩相	密度低、弱中磁、中高阻	钨、锡、钼、铁、铜、铅、锌等
	云英岩化构造变形岩相	密度低、弱磁、中高阻	钨、锡、钼、铋、铌、钽、铍、锂等
	钾长石化构造变形岩相	密度低、弱磁、中低阻	铅、锌、金、铀、稀土等
	钠长石化构造变形岩相	密度低、弱磁、高阻	钨、锡、金、铁、铜、磷、黄铁矿
	绢英岩化构造变形岩相	密度低、弱磁、中低阻	金、铜、铅、锌、钼、铋等
	绿泥石化构造变形岩相	密度低、弱磁、中低阻	铜、铅、锌、金、银、锡、黄铁矿等
	硅化构造变形岩相	密度低、弱磁、高阻	铜、钼、铅、锌、金、银、汞、黄铁矿
	碳酸盐化构造变形岩相	密度低、弱磁、高阻	铌、钽、锆等

虽然从地质标志的角度对各种构造变形岩相作出详细的划分，也给出了不同岩相的基本物性特征（图1），但能否被地球物理方法识别？还是个有待解决的问题。岩石成因对其物性参数的影响程度，目前还很难把握。构造变形岩相带是多个构造岩相亚带的集合体，是含矿地质体或含矿建造，赋存在地表以下一定的水平和垂直空间范围之内（目前所见只是已经遭受了剥蚀、改造之后保存下来的部分），其边界在哪里？如何界定？在深部找矿工作中，如何探测和识别构造变形岩相带？都是地球物理勘探方法的难题。

通常情况下，矿体在构造变形岩相带内所占的体积比较小，难以显著改变目标地质体的物性特征。矿体的宽度（品位限定）和物探方法的可

识别厚度（物性参数数据界线），也没有很好对应关系。因此，仅仅依靠手标本测量的各类构造岩石的物性特征，很难详细划分出单个的岩相。在隐伏矿床勘查工作中，往往事先并不知道勘查目标内的含矿地质体类型、边界、体积以及金属矿物的比例和空间分布特征，仅靠岩石矿物的物性参数难以准确描述目标地质体的地球物理场特征。因此，虽然目标地质体有一定的尺寸，但地球物理勘探方法的空间分辨能力，尚未达到显微镜尺度的分辨水平。

2.2 地球物理方法可以识别构造变形岩相带

前已述及，物探方法难以区分单个的构造变形岩相，如果将探测目标变更为圈定多个构造岩相集合而成的构造变形岩相带，把矿脉、蚀变围

岩和浅蚀变岩带都作为预测目标, 从而把找矿标志从几米至十几米扩大到几百至几千米宽, 即构造变形岩相带的规模可达几十米甚至几百至几千

米 (吕古贤等, 2016, 2020b), 则物探方法识别空间位置的技术组合优势就能够得到充分的体现 (表 2)。

表 2 地球物理方法的有效探测深度分级表

Table 2 Classification table of effective sounding depths by geophysical methods

能力级别	找矿目标	探测目标	探测方法	有效深度
初级	矿体、矿床	与已知矿相似的物性异常体	电阻率、磁性、密度、速度、放射性等	几十米~几百米
中级	矿床、成矿带, 常常越位使用	断裂构造带的三维分布	地震、大地电磁测深、瞬变电磁、重磁法等	几百米~几十千米
高级	矿田	含矿构造变形岩相带的三维分布	地震、大深度电磁法、重磁法等	几百米~几千米

地球物理场信息来自地下一定体积和深度范围内地质体的综合物性特征, 其分辨率取决于观测网度和方法精度, 探测效果主要取决于方法原理、观测条件和数据处理方法。由于构造变形岩相带与未变形岩石之间的密度、速度、磁化率、电性等物性参数差别明显, 更容易被高精度物探仪器识别, 从而显著提高预测水平, 对于区域地质找矿和深部找矿均具有重大意义, 值得推广。

3 构造变形岩相带与地球物理解译

3.1 构造体系控制了构造变形岩相带的结构

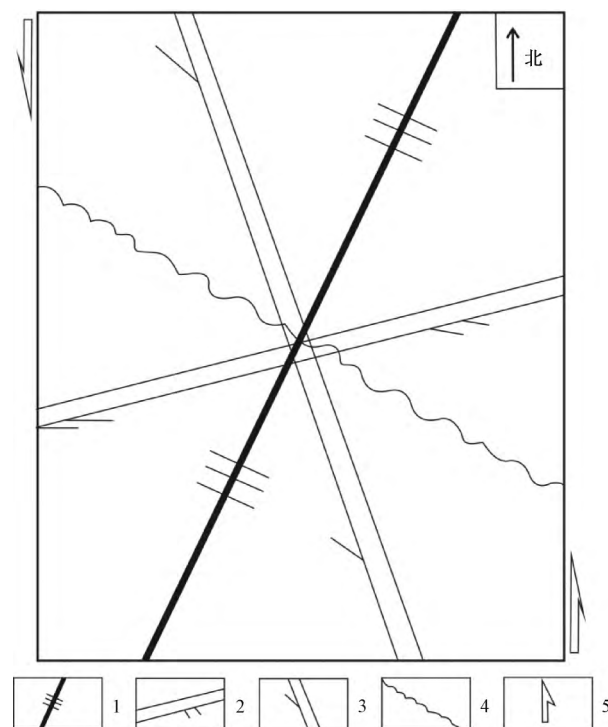
吕古贤等 (2020a, 2020c) 认为, 进行构造体系控矿分析, 不能仅把方向作为唯一标志, 更应研究结构面的多序次、多方向和多力学性质等问题。其中, 新华夏构造体系的结构面具有多种力学性质、多个展布方向和多阶段演化特征, 经共轭剪切、挤压和张裂 3 个阶段形成。

(1) 剪切阶段, 发育北北西 345° 方向 (大义山式) 张剪断裂和北东东 75° 方向 (泰山式) 压剪断裂。

(2) 挤压阶段, 形成北北东 25° 方向 (主干构造) 褶皱断裂构造带和盆地。

(3) 横张阶段, 产生北西西 300° 方向 (长江式) 张性断裂。结构面上呈 “米字形” 分布 (图 1), 其中, 剪切阶段的北北西向张剪构造和横张阶段的北西西向张性构造, 均是有利于成矿物质沉淀富集的构造环境。

新华夏构造体系的构造-建造特征在中国东部表现为中生代 “岩浆核杂岩隆起-拆离带” 特征, 构造变形岩相带是不同级别构造改造的条带状地质体, 其分布受到构造体系的分级控制 (涂光熾, 1959; 吕古贤, 1989, 2015; 吕古贤和孔庆存, 1993)。



1—新华夏挤压构造; 2—泰山式压剪构造; 3—大义山式张剪构造; 4—长江式张性构造; 5—所受外力方向

图 1 新华夏构造体系结构面及其力学分析概图 (据吕古贤等, 2020a 修改)

Fig. 1 Sketch map of the structural surface of the Neocathaysian tectonic system and its mechanical analysis (modified after Lyu et al., 2020a).

1 - Neocathaysian compressional structure. 2 - Taishan-type compression-shear structure. 3 - Dayishan-type tension-shear structure. 4 - Changjiang-type tensile structure. 5- Modes of external forces

3.2 构造体系阶段性与地球物理信息的分层次解析

通过多年的地球物理找矿实践和对比研究, 取得了一些经验和认识: ①地球物理方法观测研究的结果, 通常反映的是中、新生代以来的地质体结构构造; ②不同的地球物理方法原理不同,

对于不同深度、各向异性地质构造的分辨能力差别很大；③地球物理方法难以识别不同应力-应变特点的地质体；④各种比例尺的地球物理剖面测量工作，是在不同尺度和不同时代地质认识前提下实施的，关注的只是单一方向的构造特征，实际上难以直接对比和应用。

不同级别的构造单元内，构造体系的发育程度不同，主压应力方向不同，构造层的发育程度不同，影响的深度不同。基于岩石力学性质，在挤压-剪切-拉张的变形过程中，先成构造往往遭受了后期构造的改造。例如，在中国东部新华夏构造体系中，北西西向长江式构造带形成最晚，在较大的范围内出露不多，保存良好。相比之下，北北西向大义山式构造带形成时间较早，出露多且遭剥蚀作用强，保存程度差。此外，构造体系控制下的“米字型”构造形迹，可能存在于不同级别的构造岩内；研究工作中，要注意区分不同级别的构造应力场及其复合控岩控矿规律。以上这些不同方向的构造样式，尚处于地质认识阶段，涉及的区域较大，地质体结构和地球物理特征比较复杂，影响因素较多，有待于今后开展系统的研究。

在矿田及更大比例尺的找矿勘查工作中，应

分层次解析成矿地球物理信息，进而圈定含矿构造变形岩相带，基本原则是：①矿田内，物探扫面结合重点剖面，用构造形迹的“米字型”结构特征圈定有利成矿的构造变形岩相带；②矿区内，针对含矿构造岩相带实施剖面或面积测量，圈定找矿靶区（结合矿化和化探信息）。

3.3 应用实例：柴胡栏子地区构造格架与金矿预测

近些年来，采用上述思路，根据在中国东部内蒙古、胶东、海南等地多个金矿田开展的找矿预测研究，发现了这些矿田的共同特点：区域地球物理场资料揭示“岩浆核杂岩隆起-拆离构造”控制矿田分布，新华夏“米字型”构造体系控岩控矿，北北西—北西西向构造变形岩相带控制矿体的分布。下面的实例中，重点介绍如何从区域地球物理资料中提取构造体系信息，进而确定矿田内的找矿方向和有利成矿构造部位。

(1) 柴胡栏子-红花沟金矿田和邻区的新华夏构造体系识别和圈定。内蒙古柴胡栏子金矿田位于华北地块北缘中段，围岩是太古宙片麻岩和华力西期花岗岩、闪长岩、闪长玢岩等。对内蒙古地质矿产局提供的 1:20 万航磁资料进行地质解译（图 2），可以划分出北北西、北西西、北北东、

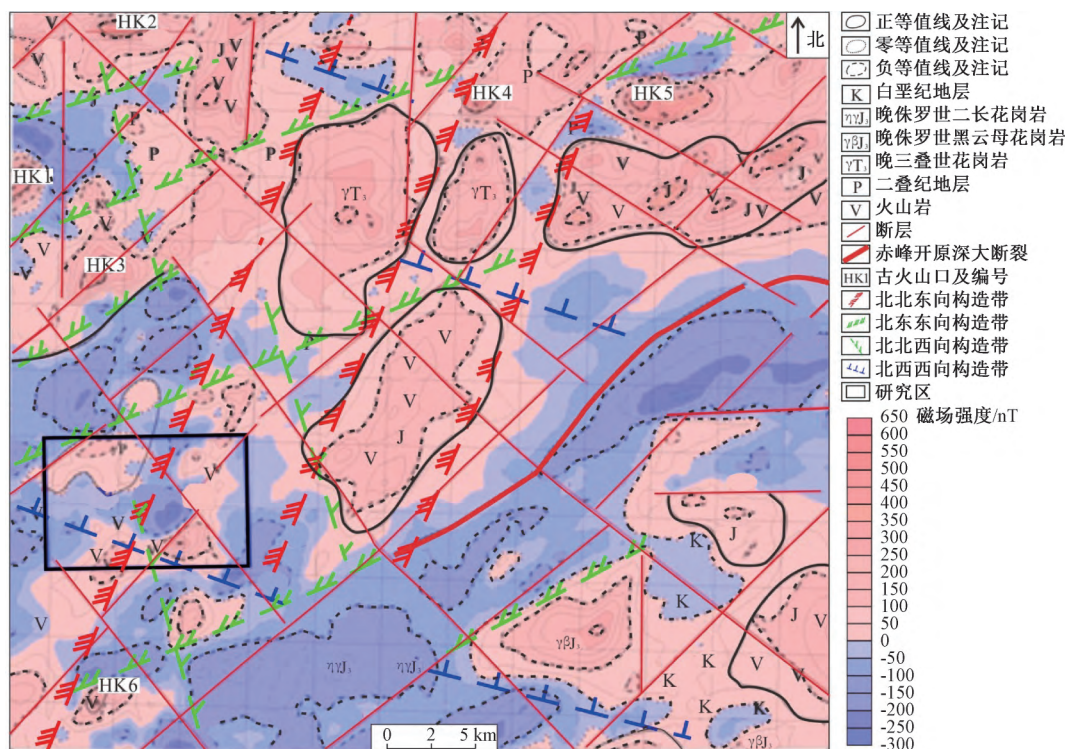


图 2 赤峰北部航磁资料解译的新华夏构造体系“米字型”结构图

Fig. 2 Sketch map showing the “* -shaped” structure of the Neocathaysian tectonic system interpreted by the aeromagnetic data in the northern area of Chifeng

北东东方向的构造带。结合构造形迹的分布,提出该区发育新华夏构造体系“米字型”结构的观点,在文中重点研究区(柴胡栏子-红花沟金矿田)发育北北西、北北东和北西西向构造(图2)。根据新华夏构造体系的演化阶段特征(吕古贤等,2020a,2020c),北北西和北西西向张扭性断裂,应该是有利的赋矿构造。

(2) 大陆深断裂带圈定与区域成矿分带。在内蒙古地质矿产局提供的1:5万航磁异常图上,可以清晰识别出北西西向展布的正磁异常带(图3),对应着新近纪玄武岩带,指示了大陆深断裂带的位置,为新华夏构造体系晚期张裂构造形迹。基于北西西向构造以及区内“北钼,南金”、“北部斑岩型矿

床,南部热液型矿床”、“北部大岩体,南部小岩株”的分布特征,重新划分了柴胡栏子地区的成矿带分界线(图3),与地质上划分的北东东向V级成矿亚带分界线完全不同。在新划定的北西西向分界线北侧,主要产出斑岩型和热液型钼多金属矿床,以及剥蚀程度较高的花岗岩基;而分界线南侧,则产出金矿床,以及中新生代花岗岩岩株和火山沉积盆地。两侧矿种和岩石产状的显著差异,是划分成矿亚带的主要标志,表明根据地球物理异常划分的分界线,更加符合地质事实和成矿规律,而且揭示了北侧剥蚀程度较高、南侧剥蚀程度较低的规律,进一步反映了区域新构造运动的差异性活动特征,也为南部亚带开展深部找矿预测提供了新的证据。

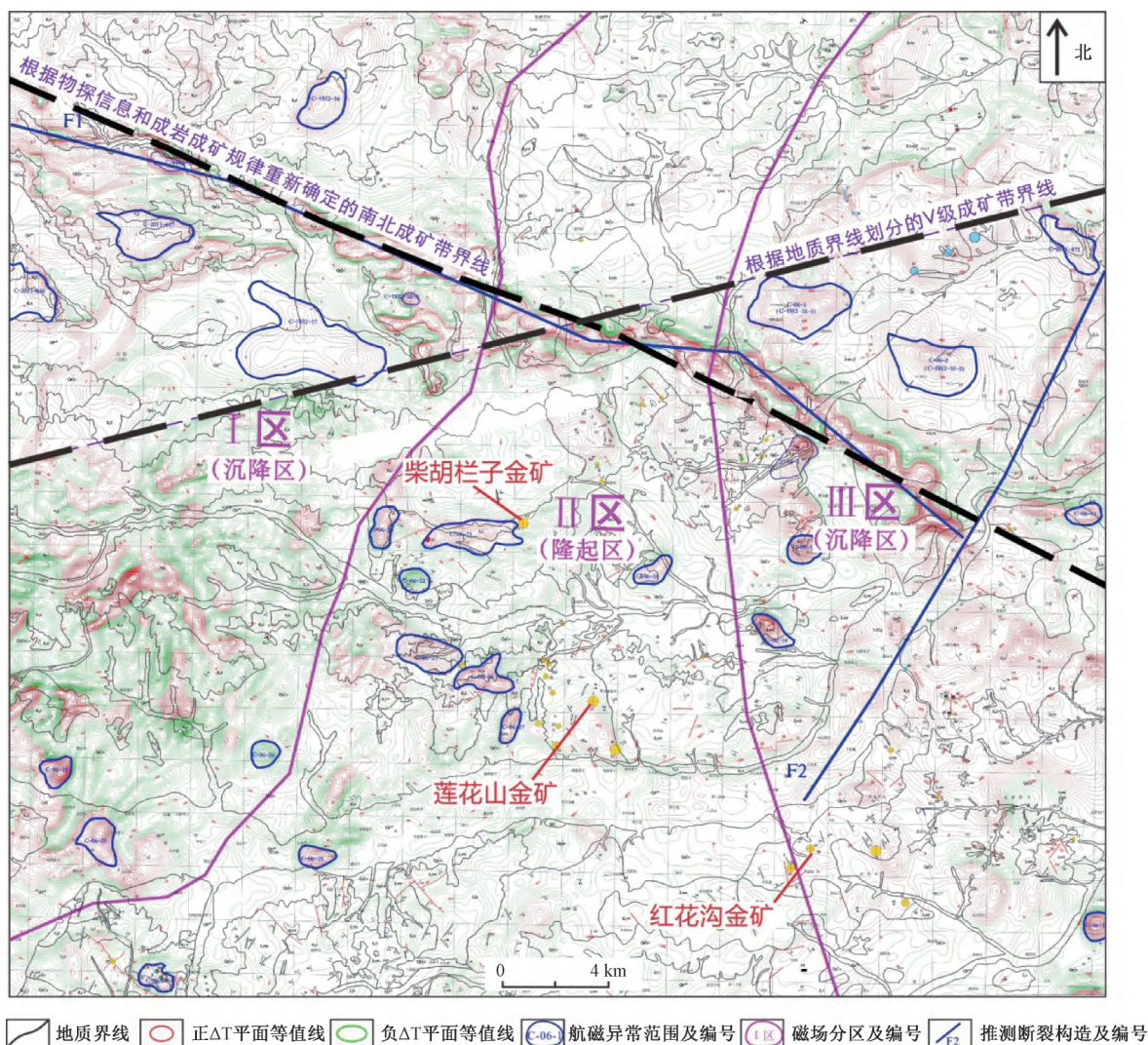


图3 柴胡栏子地区航磁资料解译的成矿带分界示意图

Fig. 3 Boundary diagram of the metallogenic belt in the Chaihulanzi area by the aeromagnetic data interpretation

(3) 成矿预测。构造体系早期北北西向断裂和晚期北西西向断裂联合控矿规律,在柴胡栏子

矿区和红花沟矿区的坑道工程材料得到证实,这一认识为矿区外围和深部找矿提供了依据。

在柴胡栏子矿区 (图 3, 图 4), K8 线、K3 线、K0 线附近发育北西西向的含矿断裂带, 截断了北北西向分布的 I 号主矿体北段, 在 K8 线附近改造了早期北北西向含矿断裂的方向, 使之转为北西向 (图 4)。在井下 697 m 中段坑道顶板, 观

察到北西西向构造破碎带切断了北北西向的 5 号含金石英脉带 (图 5)。上述现象指示矿区北西西向含矿构造形成较晚, 深部成矿潜力大, 这一规律与吕古贤提出的新华夏构造体系发育阶段具有良好的对应关系 (吕古贤等, 2020a, 2020c)。

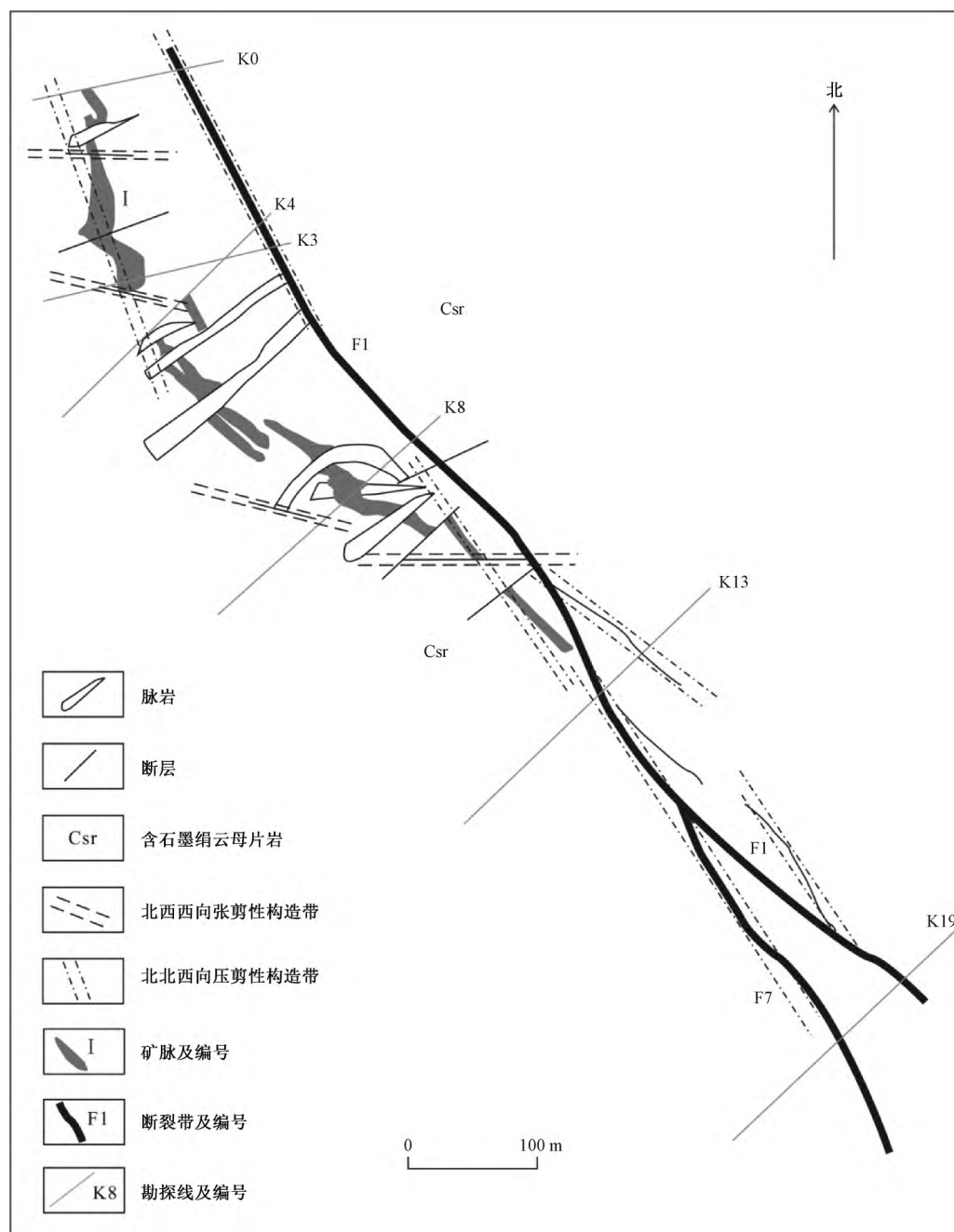
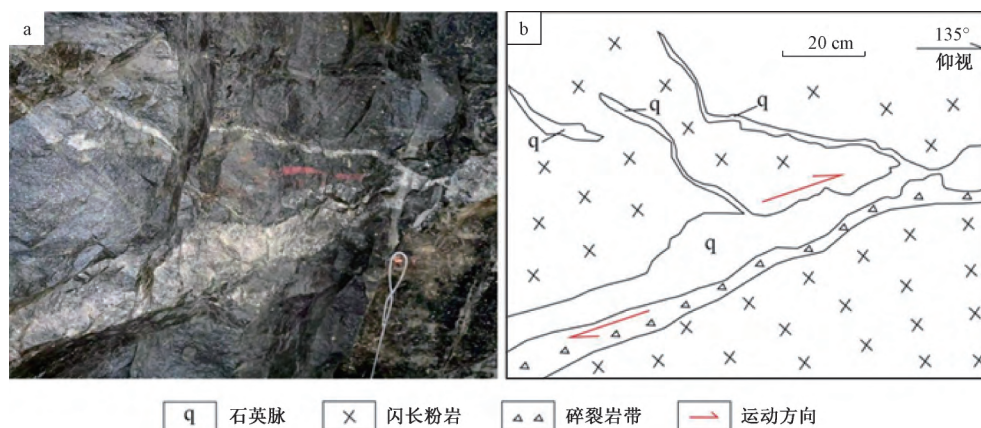


图 4 柴胡栏子金矿区 I 号含矿断裂带平面图 (据李德亭和袁怀雨, 2005 修改)

Fig. 4 Plan of No. I ore-bearing fracture zone in the Chaihulanzi gold mining area (Base map is modified after Li and Yuan, 2005)

在红花沟矿区 (图 3, 图 6), 勘探线 1 到 10 之间等间距发育了北西西向的含矿断裂带, 将北北西向的主矿体截断, 局部改造了早期含矿断裂的方向 (图 6)。同样指示了该矿区北西西向含矿

构造形成较晚的特点, 深部成矿潜力大, 这一规律与吕古贤提出的新华夏构造体系发育阶段具有良好的对应关系 (吕古贤等, 2020a, 2020c)。



a—697 m 中段坑道顶板 I-5 号脉照片; b—素描与运动学分析

图 5 柴胡栏子矿区北西向成矿构造变形特征

Fig. 5 NW trending metallogenic structural deformation features of the Chaihulanzi mining area. (a) Photograph of No. I-5 vein in the 697 m middle tunnel roof. (b) Sketch and kinematic analysis

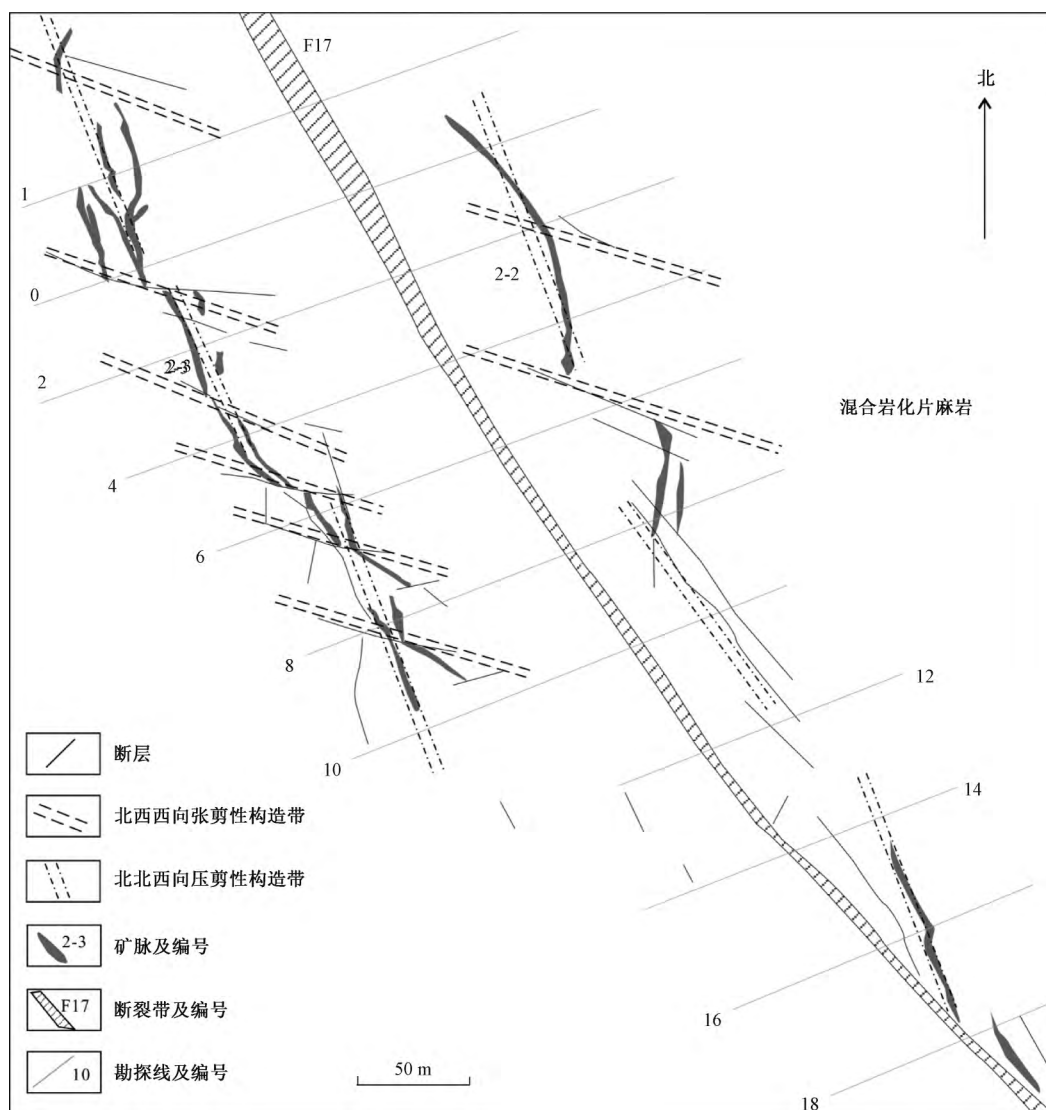


图 6 红花沟金矿区 II 号矿脉群 779 m 中段平面分布图 (据曾庆栋等, 2003 修改)

Fig. 6 Plan distribution map of the 779 m middle section of No. II vein group in the Honghuagou gold mining area (Base map is modified after Zeng et al., 2003)

4 讨论

长期以来,随着国家和企业的持续投入,各类矿带和矿区积累了海量的地球物理勘探资料,为实现找矿突破作出了重要贡献。目前多是从岩(矿)石标本的物性参数入手,以品位圈定的矿体为勘探目标,缺少从构造变形岩相带的角度开展深入研究和解释。文中提出的构造变形岩相带探测目标,有利于提升地球物理方法的勘探精度,也符合地质体本身的变化规律。

如上所述,地球物理信息的解译精度,既受到观测网度的限制,也受到目标地质体构造特征的限制。在矿区尺度的构造控矿规律研究及找矿预测方面,方维萱及其团队提出了“构造岩相学”概念并在国内外典型矿区开展了广泛的找矿实践(方维萱,2016,2017,2019;方维萱等,2018);韩润生及其团队从构造地球化学研究入手,对滇黔地区铜铅锌矿区的断裂构造岩-岩相分带提出了系统的分类标志,并且详细研究了构造的成生发展阶段(韩润生,2005;韩润生等,2011;成晨等,2019;宋丹辉等,2020)。他们的研究和应用成果,为文章从地球物理信息的角度探讨不同级别构造与成矿的关系提供了重要的地质地球化学基础。其中,大比例尺构造岩相独立填图单元的建立,丰富了自然界岩石和地质体的类型,可以成为矿区级别地球物理信息详细解译的重要参考标志。

总之,根据地球物理勘探信息,分层次圈定构造变形岩相带、含矿地质体边界,应当成为隐伏区和深部找矿勘查中重要的研究和应用方向。

5 结论

地质力学与地球物理的紧密结合,为有效使用地球物理勘探方法提供了重要前提。文章提出应重视构造变形岩相带的研究,并指出了不同级别地球物理场信息的地质构造解译重点。针对研究目标,要结合地质年代学资料和成因演化模式,从不同层次选择地球物理方法的勘探目标。具体操作步骤:首先,从面积性测量的矿田地球物理资料中解译出构造体系的“米字型”结构;然后,结合矿田地球物理场的研究成果和矿化特征,优

选出有利的成矿构造方向;最后,结合矿石和围岩的物性特征,开展剖面性的深部地球物理测量,圈定有利的含矿构造变形岩相带。这一研究方法在柴胡栏子矿田2个矿区的初步应用结果表明,北北西向含矿断裂构造形成较早,北西西向含矿断裂构造形成时间较晚,深部找矿潜力很大。

致谢:审稿人对原稿提出了重要的修改建议,沈晓丽副教授和王学海博士帮助清绘了部分图件,一并深表谢意。

References

- CHEN Y C, CHEN Z H, ZENG Z L, et al., 2013. Research on the site selection of Nanling Scientific Drilling-1 [J]. *Geology in China*, 40 (3): 659-670. (in Chinese with English abstract)
- CHENG C, HAN R S, WANG L, et al., 2019. The generation, development and ore-controlling of structures of the Fulaichang lead-zinc deposit, northeastern Guizhou [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (1): 90-104. (in Chinese with English abstract)
- DENG Z Q, WANG X G, 1993. Electrical prospecting in discovery of copper deposit, Ashele, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 11 (1): 43-56. (in Chinese with English abstract)
- FAN J, GUO Y Y, CHENG Y S, 2019. An introduction to deep resources exploration and mining, a special project of national key R&D program of China [J]. *Geology in China*, 46 (4): 919-926. (in Chinese with English abstract)
- FAN X, LÜ G X, WANG Z Y, et al., 2015. Tectonic-alteration mapping and geochemical characteristic analysis of Jiaojia Orefield [J]. *Earth Science Frontiers*, 22 (4): 46-52. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, 2016. On tectonic system of hydrothermal breccia: objective, methodology and lithofacies-mapping applications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40 (2): 237-265. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, 2017. Preliminary research demonstration on geochemical lithofacies: objective, methodology, and case applications [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37 (5): 509-527. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, DU Y L, LI J X, et al., 2018. Large scale tectonic petrographic mapping technology and prospecting prediction [M]. Beijing: Geological Publishing House; 1-377. (in Chinese)
- FANG W X, 2019. Magmatic intrusive tectonic system I: tectonic lithofacies mapping and ore-predication [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43 (3): 473-506. (in Chinese with English abstract)
- GAN F W, WANG J B, ZHU S C, et al., 2018. Rapid exploration methods of VMS type of Cu polymetallic deposits in northern Ethiopia [J]. *Mineral Exploration*, 9 (8): 1611-1621. (in Chinese with English abstract)
- GAO W L, KONG G S, PAN H P, et al., 2015. Geophysical logging in scientific drilling borehole and find of deep Uranium anomaly in

- Luzong basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58 (12): 4522-4533. (in Chinese with English abstract)
- HAN R S, 2005. Orefield/deposit tectono-geochemical method for the localization and prognosis of concealed orebodies [J]. Geological Bulletin of China, 24 (10-11): 978-984. (in Chinese with English abstract)
- HAN R S, WANG L, FANG W X, et al., 2011. The preliminary discussion on diapir structure-lithofacies zonation model for the Fengshan copper deposit, Yimen area, Yunnan, China [J]. Geological Bulletin of China, 30 (4): 495-504. (in Chinese with English abstract)
- KOZLOWSKI E A, 1989. Kola ultra deep drilling (1) [M]. ZHANG Q S, trans in chief. Beijing: Geological Publishing House: 1-218. (in Chinese)
- LEE J S, 1953. Three basic concepts of geological structure [J]. Acta Geologica Sinica, 33 (4): 253-260. (in Chinese)
- LI D T, YUAN H Y, 2005. Ore-controlling law of structures and ore prospecting direction in Chaihulanzi gold deposit, Chifeng region [J]. Metal Mine (6): 30-32, 66. (in Chinese with English abstract)
- LI Z P, 2014. The application of integrated geophysical methods to the prospecting for gold-copper deposits on the periphery and in the depth of Sarsuk area, Xinjiang [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 38 (3): 417-422. (in Chinese with English abstract)
- LIANG G H, XU X W, LIU X J, et al., 2019. Structural deformation and deep ore prediction for Satani potash deposit in Vientiane basin, Laos [J]. Geotectonica et Metallogenia, 43 (5): 934-942. (in Chinese with English abstract)
- LIU G D, HAO T Y, LIU Y K, 1997. Tectonic framework of China and its relation with mineral resources: cognition from geophysical data [J]. Chinese Science Bulletin, 42 (2): 89-95.
- LIU G D, 2015. Deep exploration: interpretation of metallogenic process and expansion of deep resources [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58 (12): 4317-4318. (in Chinese with English abstract)
- LIU J X, ZHAO R, GUO Z W, 2019. Research progress of electromagnetic methods in the exploration of metal deposits [J]. Progress in Geophysics, 34 (1): 151-160. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z D, LÜ Q T, YAN J Y, et al., 2012. Tomographic velocity structure of shallow crust and target prediction for concealed ore deposits in the Luzong basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55 (12): 3910-3922. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z H, CHEN Y S, JIA Z Y, et al., 2020. Deformation mechanism and tectonic rock types at different tectonic levels of the crust [J]. Acta Petrologica Sinica, 36 (8): 2344-2356. (in Chinese with English abstract)
- LU G X, 1991. The concept of tectonophysicochemistry [J]. Regional Geology of China, 10 (3): 254-261, 253. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, 1989. On the tectono-petrofacies form and Linglong-Jiaojia-type gold deposits in the Jiaodong peninsula, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences: 1-164. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, DENG J, GUO T, et al., 1998. Large-scale geological mapping of tectono-deformation-facies features and research of tectonic metallogenesis for the Linglong-Jiaojia type gold deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 19 (2): 177-186. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, GUO T, SHU B, et al., 2001. Large-scale mapping of tectonic deformation and facies features and their implications for the prediction of hidden deposits: a case study of the Linglong-Jiaojia style gold deposit, Jiaodong [J]. Regional Geology of China, 20 (3): 313-321. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, 2015. A discussion on the classification in ore field geology [J]. Earth Science Frontiers, 22 (4): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, WU J C, ZHU S Z, et al., 2016. Concept of Orefield geology and classification of structural lithofacies of Orefield [J]. Geological Review, 62 (S1): 321-322. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, WANG H C, HAN L, et al., 2020a. Mathematical simulation study on the distribution and evolution of the mi-shaped structure surface of neocathaysian structural system [J/OL]. Geoscience, [2021-07-17]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.064>. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, ZHANG B L, LÜ C X, et al., 2020c. Characteristics of mi-shaped structure of neocathaysian structural system in the middle and lower reaches of the yangtze river [J/OL]. Geoscience, [2021-07-17]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.065>. (in Chinese with English abstract)
- LYU G X, KONG Q C, 1993. Geology of Linglong-Jiaojia type gold deposit in Jiaodong [M]. Beijing: Science Press: 1-253. (in Chinese)
- LYU G X, LIN W W, LUO Y H, et al., 1999. Tectonophysicochemistry and gold metallogenic prognosis [M]. Beijing: Geological Press: 1-400. (in Chinese)
- LYU G X, 2003. Research and developments of tectonic physicochemistry [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (2): 101-109. (in Chinese)
- LYU G X, 2019. Research on tectonic dynamo-petrogenesis and metallogenesis and tectonophysicochemistry [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 962-980. (in Chinese with English abstract)
- LYU G X, ZHANG B L, HU B Q, et al., 2020b. Classification and application effect of tectonic deformation lithofacies in ore fields [J]. Geological Bulletin of China, 39 (11): 1669-1680. (in Chinese with English abstract)
- LYU Q T, DONG S W, TANG J T, et al., 2015. Multi-scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: a synthesis from SinoProbe-03 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58 (12): 4319-4343. (in Chinese with English abstract)
- REN G L, WANG H, LIU J P, et al., 2009. Geological characteristics and prospecting prediction of the Duolana copper deposit in Altay

- area, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 27 (1): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- REN G L, WANG H, LIU J P, et al., 2009. The geological characteristics and mineralization forecast of Duolanale cu deposit in Altay, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 27 (1): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- SONG D H, HAN R S, WANG M Z, et al., 2020. Model of tectonite-lithofacies zoning in ore-controlling faults of the Qingshan lead-zinc deposit in northwestern Guizhou [J]. Journal of Geomechanics, 26 (3): 376-390. (in Chinese with English abstract)
- TIAN J L, QIN J H, ZHENG K P, et al., 2014. Application of controlled-source audio-frequency magnetotelluric sounding in deep prospecting of the Ashele Cu-Zn deposit [J]. Mineral Deposits, 33 (S1): 821-822. (in Chinese)
- TU G C, 1959. Tectonic lithological belt of the Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Geology, 2 (7): 193-198. (in Chinese)
- WAN G P, 1994. Geologic-geophysical prospecting model for the gold deposits of crush-zone-altered & rock type in Jiaodong (Eastern Shandong) [J]. Geology of Shandong, 10 (2): 41-50. (in Chinese with English abstract)
- WEI X, YANG Z F, YAN X F, 2019. Multi-scale issue in seismic exploration and its research progress [J]. Progress in Geophysics, 34 (6): 2353-2360. (in Chinese with English abstract)
- WU C L, DONG S W, WANG L T, et al., 2016. The discovery of the syenogranite with an age of 126 Ma in the depth of Tongling: evidence from 3000 meters scientific drilling [J]. Geology in China, 43 (5): 1495-1513. (in Chinese with English abstract)
- WU X G, QIN J H, CHEN P, et al., 2019. Volcanic conduits and metallogenic model of Ashele Cu-Zn deposit [J]. Xinjiang Geology, 37 (4): 510-515. (in Chinese with English abstract)
- WU X G, QIN J H, HU L C, et al., 2020. 3D geological model and geospatial information interpretation on the basis of GeoModeller for Ashele Cu-Zn deposit, Xinjiang [J]. Mineral Resources and Geology, 34 (4): 826-831. (in Chinese with English abstract)
- XIAO F, WANG Z H, 2017. Geological interpretation of Bouguer gravity and aeromagnetic data from the Gobi-desert covered area, Eastern Tianshan, China: implications for porphyry Cu-Mo polymetallic deposits exploration [J]. Ore Geology Reviews, 80: 1042-1055.
- XIAO X, TANG J T, ZHOU C, et al., 2011. Magnetotelluric sounding in the Lujiang-Zongyang ore-district and preliminary study of electrical structure [J]. Acta Geologica Sinica, 85 (5): 873-886. (in Chinese with English abstract)
- XU S P, 2009. Gold exploration model and mineralization predication in Zhao-Ping fault zone [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-186. (in Chinese with English abstract)
- XUE H M, WU M A, MA F, 2014. Deep rock assemblage, alteration and mineralization of Luzong volcanic basin revealed by pre-drilling hole (LZSD) [C] //Proceedings of 2014 annual meeting of China joint Geosciences: topic 62: deep exploration technology and experiment: scientific drilling and geochemical benchmark papers. Beijing: Chinese Geophysical Society: 2735-2737. (in Chinese)
- YIN X Y, ZONG Z Y, WU G C, 2015. Research on seismic fluid identification driven by rock physics [J]. Science China: Earth Sciences, 45 (1): 8-21. (in Chinese)
- ZENG Q D, CHEN Y, LI G L, et al., 2003. The controlling ore law of the structures and exploration ore direction in Honghuagou gold deposit, Inner Mongolia [J]. Gold Science and Technology, 11 (5): 7-11. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B L, SU Y P, ZHANG G L, et al., 2017. Predicting method of typical ore-bearing tectonic lithofacies zones by integrated geological-geophysical information and its prospecting practice in eastern Shandong, China [J]. Earth Science Frontiers, 24 (2): 85-94. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B L, MIAO Y N, SU Y P, et al., 2018. The geological-geophysical-geochemical three fields anomalies coupling theory and its application in the positioning prognosis of concealed gold-polymetallic deposits [J]. Gold Science and Technology, 26 (4): 431-442. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B L, LYU G X, LIANG G H, et al., 2019. Preliminary study on deep geophysical exploration model of gold ore fields in Eastern Shandong, China [J]. Journal of Geomechanics, 25 (S1): 150-156. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B L, LÜ G X, YU J G, et al., 2020. A comparative study of the characteristics of tectonic deformation lithofacies belts in different ore blocks of the Linglong gold orefield in Jiaodong and the deep ore-prospecting prognosis [J]. Geological Bulletin of China, 39 (11): 1681-1691. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W, ZENG Z G, ZHOU J, et al., 2020. Broadband magnetotelluric sounding (BMT) technology search for "interface" hidden gold deposits: a case of deep prospecting in the Getang area, southwestern Guizhou [J/OL]. Geology in China, [2021-07-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200709.1339.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Z, CHEN Y C, GUO N X, et al., 2014. The geological information and investigation progresses of Nanling Scientific Drilling in the depth between 0 and 2000 m [J]. Acta Petrologica Sinica, 30 (4): 1130-1144. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU G F, 2009. The study of tectonic-alteration-facies zoning and its prospecting forecast in Linglong gold ore-field [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-113. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, DU Y S, YUAN L J, et al., 2017. Exploration models of ancient natural gas seep sedimentary-type manganese ore deposit: a case study of the Nanhua period "Datangpo" type manganese ore in the conjunction area of Guizhou, Hunan and Chongqing [J]. Acta Geologica Sinica, 91 (10): 2285-2298. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈毓川, 陈郑辉, 曾载淋, 等, 2013. 南岭科学钻探第一孔选址研究 [J]. 中国地质, 40 (3): 659-670.
- 成晨, 韩润生, 王雷, 等, 2019. 黔西北福来厂铅锌矿床构造生成发展及其控矿作用 [J]. 地质力学学报, 25 (1): 90-104.
- 邓振球, 王欣观, 1993. 新疆阿舍勒铜矿的发现与电法勘探 [J]. 新疆地质, 11 (1): 43-56.

- 樊俊,郭源阳,成永生,2019.国家重点研发计划“深地资源勘查开采”攻关目标与任务剖析[J].中国地质,46(4):919-926.
- 范潇,吕古贤,王宗永,等,2015.焦家金矿田构造蚀变岩填图及其地球化学特征分析[J].地学前缘,22(4):46-52.
- 方维萱,2016.论热液角砾岩构造系统及研究内容、研究方法和岩相学填图应用[J].大地构造与成矿学,40(2):237-265.
- 方维萱,2017.地球化学岩相学的研究内容、方法与应用实例[J].矿物学报,37(5):509-527.
- 方维萱,杜玉龙,李建旭,等,2018.大比例尺构造岩相学填图技术与找矿预测[M].北京:地质出版社:1-377.
- 方维萱,2019.岩浆侵入构造系统I:构造岩相学填图技术研发与找矿预测效果[J].大地构造与成矿学,43(3):473-506.
- 甘凤伟,王京彬,朱思才,等,2018.埃塞俄比亚北部VMS型铜多金属矿快速勘查方法[J].矿产勘查,9(8):1611-1621.
- 高文利,孔广胜,潘和平,等,2015.庐枞盆地科学钻探地球物理测井及深部铀异常的发现[J].地球物理学报,58(12):4522-4533.
- 韩润生,2005.隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法[J].地质通报,24(10-11):978-984.
- 韩润生,王雷,方维萱,等,2011.初论云南易门地区凤山铜矿床刺穿构造岩-岩相分带模式[J].地质通报,30(4):495-504.
- 科兹洛夫斯基 E A,1989.科拉超深钻井(上)[M].张秋生主译.北京:地质出版社:1-218.
- 李德亭,袁怀雨,2005.赤峰柴胡栏子金矿构造控矿规律及找矿方向[J].金属矿山(6):30-32,66.
- 李四光,1953.关于地质构造的三重基本概念[J].地质学报,33(4):253-260.
- 李忠平,2014.应用综合物探方法探测新疆萨尔苏克外围及深部金铜矿床[J].物探与化探,38(3):417-422.
- 梁光河,徐兴旺,刘兴江,等,2019.老挝万象盆地萨塔尼钾盐矿的构造变形与深部矿预测[J].大地构造与成矿学,43(5):934-942.
- 刘光鼎,郝天珧,刘伊克,1997.中国大地构造宏观格架及其与矿产资源的认识[J].科学通报,42(2):113-118.
- 刘光鼎,2015.深部探测:诠释成矿过程、拓展深部资源[J].地球物理学报,58(12):4317-4318.
- 柳建新,赵然,郭振威,2019.电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J].地球物理学进展,34(1):151-160.
- 刘振东,吕庆田,严加永,等,2012.庐枞盆地浅表地壳速度成像与隐伏矿靶区预测[J].地球物理学报,55(12):3910-3922.
- 刘正宏,陈煜嵩,贾振杨,等,2020.地壳不同构造层次岩石变形机制及其构造岩类型[J].岩石学报,36(8):2344-2356.
- 吕古贤,1989.胶东半岛构造-岩相形式及玲珑-焦家式金矿的构造动力成岩成矿地质特征研究[D].北京:中国地质科学院:1-164.
- 吕古贤,1991.构造物理化学的初步探讨[J].中国区域地质,(3):254-261,253.
- 吕古贤,2003.构造物理化学的研究进展[J].科学通报,48(2):101-109.
- 吕古贤,2015.矿田地质分类研究[J].地学前缘,22(4):1-12.
- 吕古贤,2019.构造动力成岩成矿和构造物理化学研究[J].地质力学学报,25(5):962-980.
- 吕古贤,邓军,郭涛,等,1998.玲珑-焦家式金矿构造变形岩相形迹大比例尺填图与构造成矿研究[J].地球学报,19(2):177-186.
- 吕古贤,郭涛,舒斌,等,2001.构造变形岩相形迹的大比例尺填图及其对隐伏矿床地质预测——以胶东玲珑-焦家式金矿为例[J].中国区域地质,20(3):313-321.
- 吕古贤,孔庆存,1993.胶东玲珑-焦家式金矿地质[M].北京:科学出版社:1-253.
- 吕古贤,林文蔚,罗元华,等,1999.构造物理化学与金矿成矿预测[M].北京:地质出版社:1-400.
- 吕古贤,王红才,韩璐,等,2020a.新华夏构造体系结构面“米字型”分布与演化的数学模拟研究[J/OL].现代地质,[2021-07-17].<https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.064>.
- 吕古贤,武际春,朱随洲,等,2016.矿田地质学的概念和构造岩相分类[J].地质论评,62(S1):321-322.
- 吕古贤,张宝林,胡宝群,等,2020b.矿田构造变形岩相分类与应用效果[J].地质通报,39(11):1669-1680.
- 吕古贤,张宝林,吕承训,等,2020c.长江中下游地区新华夏构造体系的“米字型”结构特征[J/OL].现代地质,[2021-07-17].<https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.065>.
- 吕庆田,董树文,汤井田,等,2015.多尺度综合地球物理探测:揭示成矿系统、助力深部找矿:长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展[J].地球物理学报,58(12):4319-4343.
- 任广利,王核,刘建平,等,2009.新疆阿勒泰地区多拉纳勒铜矿地质特征与找矿预测[J].新疆地质,27(1):24-27.
- 宋丹辉,韩润生,王明志,等,2020.黔西北青山铅锌矿床主要控矿断裂构造岩-岩相分带模式[J].地质力学学报,26(3):376-390.
- 田建磊,秦纪华,郑开平,等,2014.可控源音频大地电磁测深在阿舍勒铜锌矿床深部找矿中的应用[J].矿床地质,33(S1):821-822.
- 涂光熾,1959.祁连山的构造-岩相带[J].地质科学,2(7):193-198.
- 万国普,1994.胶东破碎带蚀变岩型金矿地质-地球物理找矿模型[J].山东地质,10(2):41-50.
- 未暇,杨志芳,晏信飞,2019.地震勘探中的多尺度问题及其研究进展[J].地球物理学进展,34(6):2353-2360.
- 吴才来,董树文,王陆太,等,2016.铜陵矿集区深部发现126 Ma的正长花岗岩:来自3000 m科学钻探的证据[J].中国地质,43(5):1495-1513.
- 吴晓贵,秦纪华,陈鹏,等,2019.阿尔泰阿舍勒铜锌矿床模型及找矿靶区预测[J].新疆地质,37(4):510-515.
- 吴晓贵,秦纪华,胡林朝,等,2020.基于GeoModeller的新疆阿舍勒铜锌矿三维地质模型及地质空间信息解译[J].矿产与地质,34(4):826-831.
- 肖晓,汤井田,周聪,等,2011.庐枞矿集区大地电磁探测及电性结构初探[J].地质学报,85(5):873-886.
- 徐述平,2009.招平断裂带金矿勘查模型与成矿预测[D].北京:中国地质大学(北京):1-186.
- 薛怀民,吴明安,马芳,2014.庐枞科学钻探预导孔(LZSD)揭示的庐枞火山岩盆地深部岩石组合与蚀变矿化作用[C]//2014

- 年中国地球科学联合学术年会: 专题 62: 深部探测技术与实验: 科学钻探与地球化学基准论文集. 北京: 中国地球物理学会: 2735-2737.
- 印兴耀, 宗兆云, 吴国忱, 2015. 岩石物理驱动下地震流体识别研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 45 (1): 8-21.
- 曾庆栋, 陈岩, 李国良, 等, 2003. 内蒙红花沟金矿构造控矿规律及找矿方向 [J]. 黄金科学技术, 11 (5): 7-11.
- 张宝林, 苏艳平, 张国梁, 等, 2017. 胶东典型含矿构造岩相带的地质-地球物理信息预测方法与找矿实践 [J]. 地学前缘, 24 (2): 85-94.
- 张宝林, 苗雅娜, 苏艳平, 等, 2018. “地物化三场异常耦合理论”及其在隐伏金多金属矿床定位预测中的应用 [J]. 黄金科学技术, 26 (4): 431-442.
- 张宝林, 吕古贤, 梁光河, 等, 2019. 胶东金矿田的深部地球物理勘查模式初步研究 [J]. 地质力学学报, 25 (S1): 150-156.
- 张宝林, 吕古贤, 余建国, 等, 2020. 胶东玲珑金矿田不同矿段构造变形岩相带特征与深部找矿预测 [J]. 地质通报, 39 (11): 1681-1691.
- 张伟, 曾昭光, 周军, 等, 2020. 宽频大地电磁法寻找“界面型”隐伏金矿床: 以黔西南戈塘地区深部找矿为例 [J/OL]. 中国地质, [2021-07-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.2020.0709.1339.002.html>.
- 赵正, 陈毓川, 郭娜欣, 等, 2014. 南岭科学钻探 0~2000 m 地质信息及初步成果 [J]. 岩石学报, 30 (4): 1130-1144.
- 周国发, 2009. 玲珑金矿田构造蚀变岩带及找矿预测研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京): 1-113.
- 周琦, 杜远生, 袁良军, 等, 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型: 以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例 [J]. 地质学报, 91 (10): 2285-2298.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

